

PATKÓS ANDRÁS

A Mindenség mérése



*Patkós András
fizikus,
az MTA levelező tagja*

A Világmindenség kora, mérete, a benne található anyag mennyisége és összetétele az emberi környezetben felfedezett természeti törvényekre építő asztrofizikai megfigyelési programokkal tanulmányozható. Az észlelési technikák és adatfeldolgozási módszerek tökéletesedésével alig egy évtized alatt ugrásszerűen nőtt a kozmológiai adatok ismeretének pontossága. A több mint tízmilliárd évet felölelő eseménysorra vonatkozó tudományos kép megszilárdulása megengedi, hogy még messzebbre kíséreljünk meg behatolni Univerzumunk múltjába. A kozmikus archeológia sok hasonlóságot mutat a földi régészek módszereivel és gondolkodásával. A 21. században választ remélünk sok, nemrég még egzotikusnak hangzó kérdésre is, például arra, hogy mitől forrósodott fel az Univerzum, vagy hogy mi előzte meg a Forró Univerzumhoz vezető ősrobbanást.

1947-ben született. 1970-ben szerzett diplomát az ELTE Természettudományi Karán. 1977-től a fizikai tudomány kandidátusa, 1987-től akadémiai doktora lett. 2001-től az MTA levelező tagja.

Pályáját az ELTE TTK Atomfizikai Tanszék oktatójaként kezdte, 1989-től egyetemi tanár, 1989-től 1992-ig a Fizikai Tanszékcsoport vezetője, 1998–2003 között az Atomfizikai Tanszék megbízott vezetője, jelenleg az ELTE-MTA Statisztikus Fizikai Kutatócsoport vezetője.

Számos külföldi egyetemen (Koppenhága, Bonn, Genf, Uppsala, Strasbourg, Bielefeld, Heidelberg stb.) volt vendégkutató, illetve vendégprofesszor. Az MTA Részecskefizikai Bizottságának tagja. 1987-től a *Természet Világa* című folyóirat szerkesztőbizottsági tagja.

Főbb kutatási területei: elméleti részecskefizika, a kvantumtérelmélet alapállapotának tulajdonságai, egyensúlyi fázisátalakulások, a kvantumterek egyensúlytól távoli dinamikája, a Forró Univerzum kialakulása.

Mi a kozmológia?

Az **Univerzum** egészének keletkezését és fejlődésének történetét tanulmányozó tudományterületet *kozmológiának* hívják. E témakör legfontosabb kérdései a következők:



Univerzum:

a világegyetem. Szűkebb értelemben (belátható Univerzum) azt a térbeli tartományt jelenti, amelyet vizsgálni tudunk: vagyis világegyetemünk azon részét, ahonnan keletkezése óta a véges sebességgel terjedő fény eljuthatott hozzánk.

Ősrobbanás:

az eddigi legelfogadottabb elmélet a világegyetem keletkezésére az Ősrobbanás elmélete. Az elnevezés arra utal, hogy a megfigyelt extragalaktikus objektumok távolodnak egymástól, vagyis időben visszakövetve útjukat egy szingulárisan kicsiny tartományból származnak.



A Tejút

- › Milyen távol van a legtávolabbi galaxis? (És mi van azon is túl?)
- › Hogyan keletkezett az Univerzum? Mikor volt az **Ősrobbanás**? (És mi volt annak előtte?)
- › Hogyan mozog az Univerzum egésze? (És mi mozgatja? És mi lesz jövőbeli sorsa?)

A fő kérdésekre – néhány számszerűen jellemezhető adat egyre pontosabb ismeretében – egyre határozottabb válaszokat adhatunk. A megfigyelhető Univerzum méretét, életkorát, a benne előforduló anyag mennyiségét és az anyag főbb fajtáinak relatív előfordulási gyakoriságát hívjuk *kozmológiai paramétereknek*.

Ezek az adatok nagyon hasonlatosak egy személy vagy egy érdekes tárgy legfontosabb fizikai jellemzőire vonatkozó kérdéseinkhez: egy kiváló atlétának vagy egy szépségkirálynőnek nagy valószínűséggel a *korát*, a *méreteit* (*magasság, mellbősség, lábméret*) és a *tömegét* (*súlyát*) firtatnánk. Ez a profán párhuzam is azt példázza, hogy a tudományos kutatás legfontosabb kérdései mélyen emberiek. Talán ez a titka, hogy a szakmai ismeretekkel nem rendelkezők is nem szűnő kíváncsisággal fordulnak a csillagos ég egyre távolabbi tartományaiából észlelt jelekről és értelmezésükről szóló híradások felé.

Az egyik legelterjedtebben használt amerikai egyetemi kozmológia-tan-könyv húsz évvel ezelőtt így fogalmazott: „Az Olvasó szerencsésnek érezheti magát, hogy olyan korban él, amikor a tudomány már képes egy olyan alapvető mennyiséget, mint az Univerzum kora, egy kettes szorzófaktor bizonytalansága erejéig meghatározni.” Az akkori adatok alapján az Univerzum korát tíz- és húszmilliárd év közöttire becsülték.

A 20. század utolsó évtizedében felgyorsultak a kozmológiai megfigyelő kutatások. 2003 márciusa óta az Univerzum életkorára vonatkozó „hivatalos” adat: 13,5–13,9 milliárd év, azaz a 100 százalékos hiba helyére 2 százalékos bizonytalanság lépett. A belátható Univerzum mai „sugárirányú” mérete nagyjából 26 milliárd fényév, miután a legkorábban sugárzó források közben távolabb kerültek. Úgy tűnik, hogy egyéb méretek megadására nincs is szükség, mert a Világmindenség egésze, a megfigyelési pont helyzettől függetlenül, gömbszerűen szimmetrikus tulajdonságokat mutat, bármely irányban végzünk is vizsgálatokat. Végül, az Univerzumot mozgató különféle anyagfajtáknak a láthatárunkon belülrre eső együttes tömegét Galaxisunk (a Tejút) tömegének 1000 milliárdszorosára becsülik.

Szeretném, ha az előadás végére egyetérthetnénk abban, hogy a rohamosan pontosodó mérések és a mérési stratégiát meghatározó elméleti gondolkodás dinamikája következtében a kozmológia a 21. század egyik vezető természettudományos kutatási irányává alakul.

A Mindenség mérésének lehetőségéről

A Világmindenségre vonatkozó kutatás a legnagyobb léptékű méretskálán végzett megfigyelésekből igyekszik válaszolni a Mindenséget mozgató erők mibenlétét firtató kérdésekre. Kozmikus léptékű kísérletek végzésére nincs

felhatalmazásunk egyetlen Univerzumunkban. Erre a kutatói megközelítésre teljes mértékben érvényes Isaac Newtonnak a *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* (A természetfilozófia matematikai alapelvei) című munkájában, 1687-ben megfogalmazott célkitűzése: „A természetfilozófia feladata abban áll, hogy a *mozgásjelenségekből következtessen a természeti erőkre*, és ezeknek az erőknek az ismeretében találjon magyarázatot a többi jelenségre is.”

A modern fizikának Galilei, Kepler és Newton munkásságával elindult története négy alapvető kölcsönhatást tárt fel. A mai kozmológusok e törvényeket hipotetikusán az Univerzum egészére érvényesnek fogadják el. Az egyre pontosabb megfigyelési programok stratégiáját e törvényekre alapozott előrejelzésekre építik. Az egyre távolabbi tartományokból érkező új tapasztalati tények értelmezésekor a kutatók azt is ellenőrzik, hogy a földi laboratóriumokban felfedezett kölcsönhatások irányítják-e az Univerzum távoli tartományainak történetét is. Készen állnak arra, hogy a bennünket alkotó anyag elemi építőköveitől eltérő, új anyagfajtákat és köztük ható új erőket fedezzenek fel a „konzervatív” várakozásoktól esetleg eltérő megfigyelési eredmények háttérében. Az is kiderülhet, hogy a kölcsönhatások ma ismert törvényszerűségeinek története van, és milliárd évvel korábban az anyag szerveződése a ma ismerttől eltérő törvényeknek engedelmesskedett.

Nem kívánok elhallgatni bizonyos súlyos kételyeket sem, amelyekkel a Mindenség egészére érvényes törvények létét és feltárhatóságát sok tudós is illeti. A modern fizika (és nyomában minden természettudományos kutatási irányzat) lényege a kísérlet, amely a jelenségeknek kontrollált körülmények közötti *ismételt előidézését* és az eredményeknek a matematikai statisztika eszközeivel való *megbízhatósági ellenőrzését* is előírja. Nem világos, hogy egyetlen Univerzumunkat (amelynek neve is jelzi egyedülvalóságát) ilyen statisztikai jellegű jellemzéssel hogyan közelíthetjük meg. E korlátot hangsúlyozva sokan felvetik: nincs-e határa az újkori tudomány módszereivel a világegyetem egészére feltehető és megválaszolható kérdéseknek? Előadásom azokról az erőfeszítésekről is szól, melyekkel a kutatók a tudományos módszerű megismerés érvényességi határait időben és térben egyre távolabb helyezik.



Newton, Sir Isaac
(1643–1727)



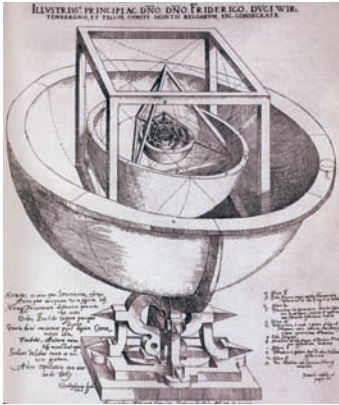
Galileo Galilei (1564–1642)

Az Univerzum kutatása: kozmikus archeológia

A csillagász, az asztrofizikus, a kozmológus (akik ugyanannak a tudományos nemzetségnek kissé eltérő „tájszólást” beszélő tagjai) az Univerzumot szinte kizárólag az elektromágneses sugárzást (azon belül fényt) kibocsátó objektumokat megfigyelve vizsgálja. (Nagy reményeket fűznek a kizárólag gyenge kölcsönhatásban részt vevő **neutrínók** megfigyeléséből kapható információkhoz, de mindeddig csak egyetlen kivételes csillagászati esemény kapcsán sikerült Naprendszeren kívüli, azaz kozmikus neutrínókat detektálni.

Neutrínó:

elemi részecske, elméleti feltételezések és megfigyelések alapján csak gyenge kölcsönhatásban vesz részt. Nagy számban keletkeznek szupernóva-robbanások során.



Johannes Kepler bolygómodellje,
1596

A potenciálisan egyedülálló információkat hordozó kozmológiai eredetű gravitációs hullámok kimutatása a növekvő erőfeszítések ellenére még évtizedeket várthat magára). A fény véges sebességgel halad, a Nap fénye 8 perc alatt ér a 150 millió kilométer távolságra lévő Földre. A csillagászatban az *1 fényév*, a fény által egy év, azaz $365 \times 24 \times 60$ perc alatt megtett távolság használatos a távolság egységeként, ami a Nap–Föld távolság mintegy hatvanezerszerese. Több mint tízmilliárd évre van szüksége a fénynek ahhoz, hogy a megfigyelhető Univerzum legtávolabbi pontjából eljusson hozzánk.

Nyilván minél távolabbról érkezik a fénybe kódolt információ, annál régebben indult útjára, azaz annál régebbi kozmikus jelenségről hoz hírt. Ez a körülmény lehetőséget ad az Univerzum történetének feltárására, ha pontosan meg tudjuk határozni a fényforrások távolságát. Az Univerzum egész történetén áthaladó fény által hozott információk távolság, azaz korok szerinti szétválasztásának feladata közelíti a kozmológus munkáját az emberi múltat kutató régészéhez. Célunk, hogy megismerjük az Univerzum történetének egyes korszakait.

A földi régész az ember által fokozatosan egymásra épített rétegek korát például a maradványok környezetében talált fémpezsek, cserepek és más, dátumot hordozó tárgyak révén határolja be, a különböző korú rétegek törmelékes maradványait óvatos munkával szétválasztja egymástól. Az azonos korú törmelékekből megkísérli az egykori tárgy, épület, festmény stb. fizikai rekonstrukcióját. Ugyanígy vadászik a kozmológus is a korai Univerzum egy meghatározott korszakáról hírt adó, jellemző relikviákra. Ezek olyan tipikus kozmikus objektumok, jelenségek, amelyek elég egyszerűek ahhoz, hogy a fizika mérési eszközeivel tanulmányozhatók legyenek, és létrejöttük megértéséhez a fizika törvényeit hívhassuk segítségül.

Az igazi régészhez méltó végső kihívás valamely rekonstruált relikvia „üzenetének”, a kor emberi (tárgyi és szellemi) környezetében hordozott jelentésének, az akkori társadalomról szóló híradásának megfejtése. Ezzel a szellemi próbatétellel állítható párhuzamba az elméleti fizikus feladata, hogy értelmezze azt az összefüggést, mely valamely kozmikus jelenség és az Univerzum egészének mozgása között áll fenn.

A régész a római kort jellemző lakóházszerkezetek ismeretében jelentheti ki, hogy a szőnyi vásártéren fellelt töredékekből életre hívott freskó minden bizonnyal a ház mennyezetét, nem pedig oldalfalát díszítette. A szimbolikus ábrázolás figuráinak jelentését keresve megvizsgálja a 3–7. századból a Földközi-tenger medencéjében ránk maradt, freskókat hordozó építményeket, és felismeri, hogy ez az az időszak, amikor az épületek szerkezeti elemei között megjelenik a kupola. Az első kupolákban fellelt díszítő ábrázolások pedig a korabeli himnuszok és más műfajú leírások szerint mind az égbolthoz kapcsolódtak (még a templomokban is). Ez annál is könnyebben érthető, mert a görögök és a rómaiak főistenei Napistenek voltak, és tiszteltük természetes módon tartalmazta az ég jelenségeinek a templombeli megjelenítését. Egy ruhátlan nőalak és egy feléje forduló ló együttesének megfelelőjét keresve az égbolt csillagképei között rátalál az égbolton szomszédos Androméda és Pegazus csillagképekre. Ezek az ókor egyik közismert



A szőnyi freskó központi alakja
(kinagyítva, Borhy László felvétele)



*Az Androméda-freskó művészi
rekonstrukciója
(Borhy László felvétele)*

mitológiai történetét az égboltra vetítő csillagképcsalád tagjai, s a Kassiopeia, a Cepheus és a Cetus csillagképek társaságában az őszi északi égbolt egyik legjobban látható, az éjszakai tájékozódást segítő szegmensét foglalják el. Érdekes, hogy a régészek sokáig hajlottak a képnek egy tengeri csikón lovagoló Néreidával való azonosítására, amíg meg nem találtak egy festménytöredéket, amely a lóalak patáját mutatta.

A rekonstrukció elkészülte után a régész a klasszika-filológia ismeretanyagát hívja segítségül, hogy megfelejtse a szőnyi freskón az állandó csillagok konstellációit szimbolizáló központi alakokat és a kép külső részén a földi évszakok változását illusztráló motívumokat egymástól elválasztó kettős körgyűrű kozmológiai jelentését. A földi légkör kék gyűrűje határolja a Föld (az anyag) szféráját, és a belső, vörös tűzgyűrű által közrefogott éteri szférának köszönheti az égbolt a stabilitását. A levegő és az éter természetét megfogalmazó klasszikus szerzők művei a két tartományt összekapcsoló díszítő elemeket is jelentéssel ruházzák fel. A régész és a klasszika-filológus összefogásával kibontakozik előttünk a római kor Univerzum-felfogása egy pannóniai villa termékének falain. Az ELTE régészei Borhy László vezetésével – Harsányi Eszter és Kurovszky Zsófia festő-restaurátorművészek közreműködésével – Komárom-Szőnyben (római nevén Brigetióban) a kétezer évvel ezelőtti kozmológiai elképzelések ritka teljességű relikviáját rekonstruálták.

A különböző kozmikus korszakok relikviáinak tanulmányozásával mi az Univerzum folyamatosan változó szerkezetét meghatározó fizikai hatások történetét kívánjuk rekonstruálni. A csillagászat és az asztrofizika eszközeivel három, jól megkülönböztethető korszakban keletkezett „kozmosz relikvia” tanulmányozása folyik:

- › az Univerzum anyagszigetei, a **galaxisok**;
- › a kozmikus háttérsugárzás;
- › a kémiai elemek magjainak ős-szintézise.

Galaxis:

Csillagváros, Univerzum-sziget: megfigyelések alapján a csillagok nem egyenletesen oszlanak el a világegyetemben, hanem csoportokba tömörülve találhatók. Egy-egy galaxis sok millió vagy milliárd csillagot is tartalmazhat. Saját galaxisunk a Tejút.



Parallaxis:

egy test pozíciójának szögeltolódása, amikor különböző térbeli pontokból figyelik meg. Csillagok esetében a parallaxis az az ívmásodpercben kifejezett szög, amelynek a kétszerese a Földpálya két áttelleges pontjából végzett megfigyeléskor tapasztalható pozícióeltolódás. A csillagparallaxis tehát az a szög, amely alatt az átlagos Föld–Nap távolság a csillagról nézve látszik. Ezért a földi megfigyelő számára a csillag az égbolton zárt pályát ír le.

Távolságlétra:

a csillagászatban használatos, egymásra épülő, egymást hitelesítő távolságmérésre alkalmas módszerek összefoglaló neve. Az elnevezés onnan ered, hogy az egyes módszerek a létra fokaihoz hasonlóan követik egymást, így módon mindig felhasználják a korábbi mérési módszer eredményeit.

Cepheidák:

a változó csillagok egyik típusa. Viszonylag nagy tömegű fényes szuperóriás csillagok, néhány nap, hét periódussal változnak (klasszikus Cepheidák). Egy kisebb csoportot alkotnak az úgynevezett II. populációs Cepheidák: kis tömegű, valamint halványabb változó csillagok. Periódusidejük a klasszikus Cepheidákhoz hasonló.

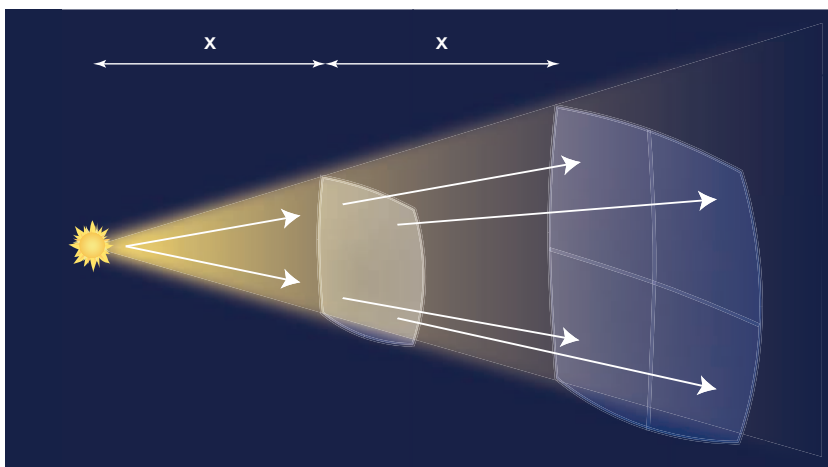
A sugárzási teljesítmény csökkenése a távolsággal

Az elmúlt bő évtizedben az első két területen értek el kiemelkedő eredményeket, ezért alább ezekkel foglalkozom. A nukleáris és részecskefizikai őstörténet megérdemel egy önálló előadást.

Távolságmérés a kozmoszban

A közeli csillagászati objektumok méreteinek és távolságának megállapítására a görög geometerek matematikailag pontos eljárásokat ajánlottak, amelyeket csak a mérést céltudatosan alkalmazó újkori tudomány tudott kielégítő pontossággal megvalósítani. A kis mérési pontosság tette elfogadhatóvá a Föld-középpontú ptolemaioszi Univerzumot. Az állócsillagok látszólagos mozgásának felfedezéséhez (**parallaxis**), amelyet Arisztotelész is a Föld mozgásának lehetséges bizonyítékaként fogalmazott meg, a megfigyelési pontosság fokozása vezetett. A parallaxis-mozgásra épülő távolságméréssel induló fejlődés hosszú útjáról itt nem tudunk beszámolni, a továbbiakban csak a modern kozmológiában, a kozmikus távolságok mérésében fontos szerepet játszó két újabb távolságmérési mód (**távolságlétra**) felvázolására van lehetőségünk.

A távolság mérését minden esetben viszonylag gyakori előfordulású, közel azonos belső csillagdinamikájú (**standard gyertya**) csillagok megfigyelésére építik. A viszonylagos távolság megállapítása azon az előfeltevésen alapszik, hogy valamely azonos működésű csillagfajta egyes egyedei azonos fényteljesítményt bocsátanak ki. Miután a teljesítmény a távolság négyzetével arányosan növekvő felületen oszlik szét, egyszerű összefüggés adja meg a csillag *látszólagos fényességének négyzetes* csökkenését a távolság függvényében. Persze olyan jelenséget kell választanunk, amelyről okkal remélhetjük, hogy bekövetkeztének időpontjától független a jelenséget kísérő fénysugárzás teljesítménye.



Első példánk története a 20. század első évtizedéig nyúlik vissza, amikor Henrietta Leavitt, amerikai csillagász vizsgálta Galaxisunknak, a Tejútnek azokat a csillagait, amelyek fényessége néhány napos periodicitással válto-

zik. Érdekes egybeesés, hogy az ilyen csillagok prototípusa a brigetiói égboltábrázolás bővebb mitológiai csillagképcsaládjának egyik tagjában, a Cepheusban elhelyezkedő egyik csillag, ezért e csillagokat **Cepheidák**nak hívják. Henrietta Leavitt felfedezte, hogy az átlagos fénytelsítmény egyenletesen nő a **pulzáció** periódusidejének növekedésével. Ezzel a periódusidő mérésére vezette vissza a Cepheidák abszolút fénytelsítményének meghatározását. Az így kapott abszolút teljesítményt az észlelhető gyengébb fényességgel összevetve meghatározta az új objektumnak a referencia-ként használt (ismert távolságú) Cepheidához képesti relatív távolságát.

Edwin Hubble azzal a felfedezésével „teremtette meg” a kozmológiát, hogy 1924-ben az Androméda csillagkép irányában, egy szabad szemmel éppen látható, halvány foltként észlelhető csillaghalmazban sikerült egy Cepheidát kimutatnia. Ennek távolságára kétmillió **fényév** adódott, amivel Hubble bebizonyította, hogy a folt csillaghalmaza a Tejútól távoli, független „Univerzum-sziget”, mai szóval galaxis. A galaxiskatalógusokban az M31 nevet viselő Androméda galaxis a hozzánk legközelebbi galaxis, amelyből még ezermilliárd van az Univerzumban.

Az 1920-as években a csillagászok egyre több különálló galaxis létét bizonyították, és Hubble szisztematikusan vizsgálta az azokból érkező fény színképét. A földi spektroszkópusok által részletesen tanulmányozott hidrogén-színképet ismerte fel kissé eltorzítva. A hidrogén által kisugárzott fény diszkrét frekvenciái annál jobban eltolódtak a kisebb frekvenciák, azaz a kéktől a vörös felé, minél nagyobb volt a fényesség alapján meghatározott távolság. Ezt hívják **vöröseltolódás**nak. Az az ábra, amely a vöröseltolódás függvényében mutatja az egyes galaxisok távolságát, a *Hubble-diagram*. Edwin Hubble 1929-ben talán tucatnyi galaxist ábrázolt ebben a diagramban, amelyek közül a legtávolabbi is alig egyszázalékos vöröseltolódást mutat. A *Hubble-törvény* a következő egyszerű megfogalmazásban állítható fel: a vöröseltolódás mértéke és a luminozitási távolság között egyenes arányosság áll fenn. Érdekes a diagramon újabb adatokat is mutatni, amelyek iga-

Pulzáció:

a csillagok periodikus méret-változtatása, felfúvódása, majd összehúzódása. Szélsőséges esetekben a pulzáció lehet nagyon gyors, illetve nagyon nagymértékű, a folyamatot a fényesség megváltozása kíséri. (Néha egyes csillagok képesek más színképosztályokba átlépni ilyen módon).

Fényév:

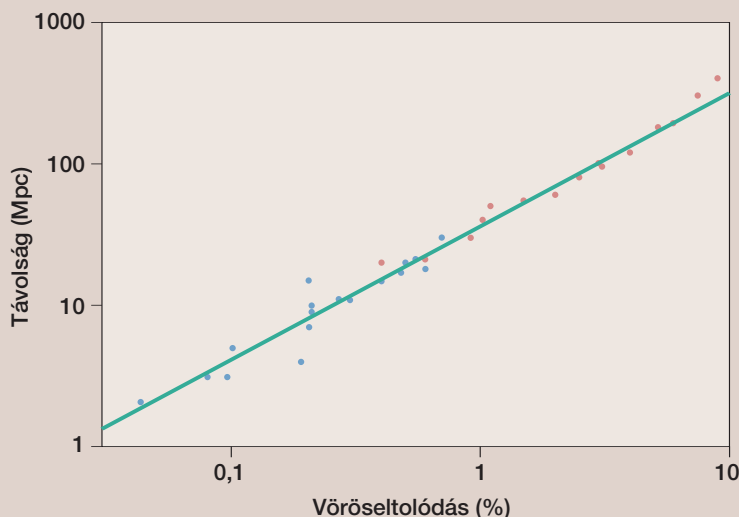
a csillagászati távolságmérés egyik egysége: az a távolság, amit vákuumban a fény egy év alatt megtesz; megközelítőleg $9,46 \times 10^{12}$ km. 1 parsec = 1 pc = 3,26 fényév.

Vöröseltolódás:

nagy távolságú objektumok színképében található jellegzetesség: a földi körülmények között megfigyelt kémiai elemekre jellemző vonalak eltolódnak a vörösebb tartomány felé. Ennek oka, hogy a forrás távolodik tőlünk, illetve hogy a fény egy táguló világegyetemen keresztül jut el hozzánk.

Standard gyertya:

azon csillagászati objektumok vagy jelenségek összefoglaló neve, amelyek esetében nemcsak a Földön megfigyelt látzólagos fényesség határozható meg, hanem az abszolút fényességük is. Emiatt jól alkalmazhatók távolságmeghatározásra.



Hubble törvényének mai igazolása a közeli Cepheidák (kék pontok) és a kissé távolabbi szupernóvák (piros pontok) alapján



Ia típusú szupernóvák (SN Ia):

a szupernóva-robbanások egy speciális típusa. Kettős csillagrendszerekben következnek be; jellemzője, hogy a színképe nem tartalmazza a hidrogénre jellemző spektrumvonalakat. Érdekességük, hogy a robbanás mindig egy kritikus tömeg elérésekor történik, emiatt a kisugárzott fényteljesítmény hasonló nagyságú. Ez utóbbi tulajdonság miatt alkalmasak standard gyertyának.

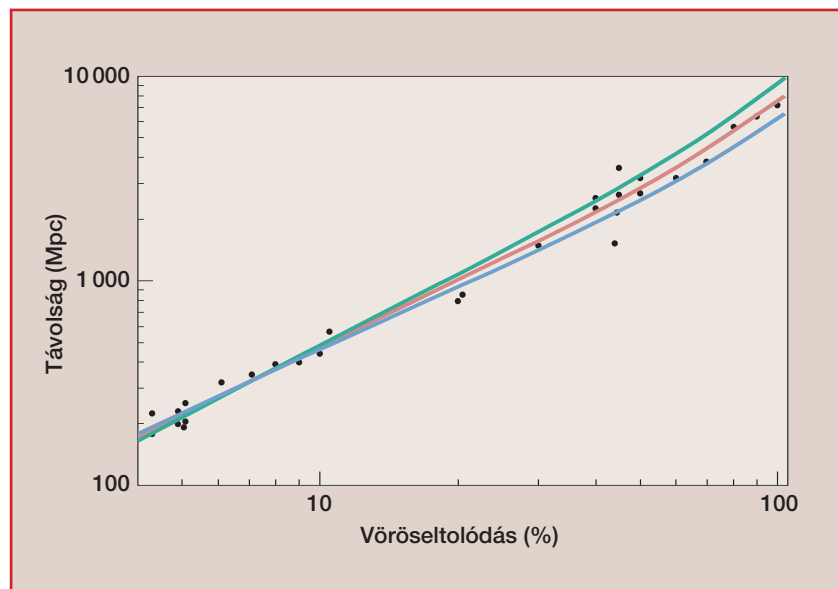
zolja, hogy az eredeténél sokszorta nagyobb távolságra kiterjesztve is érvényes Hubble felfedezése.

Ekkora távolságokon azonban a Cepheidákra alapozott távolságmérési módszer nem működik. A második példánkban szereplő változó fényességű standard gyertya fényforrásra Walter Baade már az 1930-as években felhívta a csillagászok figyelmét. Javaslatát céltudatos megvalósítására az elmúlt évtizedben került csak sor. A késésnek az az oka, hogy az úgynevezett **Ia típusú szupernóvák** módszeres vizsgálata – a robbanás bekövetkeztének előreláthatatlansága miatt – egy költséges készenléti szolgálat megtervezését és működtetését igényli. A távolságmérésre alkalmasnak tűnő, robbanó csillagok úgynevezett kettős csillagrendszerben fordulnak elő. A kötött rendszer kisméretű csillagtagjának gravitációs hatása óriáscsillag partnerének csillaglégköréből folyamatosan anyagot szivattyúz át. Növekvő tömege tömegvonzási hatásának saját nyomása egy tömeghatáron túllépve nem tud ellenállni, a csillag összeroppan, szupernóvaként villan fel. A közel azonos tömeg és anyagi összetétel okán ezeknek a felvillanásoknak az energiataralma közel azonos, a kisugárzás fényességének időbeli lefutása is nagyon hasonló.

1998-ban, közel tízéves gyűjtőmunka után, két csillagászcsoporthoz egyaránt függetlenül összesen 42 úgynevezett SN Ia szupernóva fénygörbéjét és látszólagos fényességét tette közzé, amelyek alapján sikerült azoknak a galaxisoknak a távolságát megállapítani, amelyekben a robbanás bekövetkezett. Köztük 60–70 százalékos vöröseltolódást mutatók is voltak, ezek alapján immár jelentősen megnövekedett tartományban vizsgálható a Hubble-törvény érvényessége.

A Ch. J. Doppler osztrák fizikus által felfedezett, közismert hatás alapján a sugárzás színének észlelt vörösödését a forrás állandó sebességű távolodása okozza. Ezért a Hubble-törvény közismert megfogalmazása valójában a világegyetem legfontosabb globális mozgástörvénye: *a galaxisok a távolságukkal arányban növekedő sebességgel távolodnak egymástól.*

Hubble törvényének teljesülése az Ia típusú szupernóvák alapján (100 százalékos vöröseltolódásra már eltérés fedezhető fel a lineáris törvénytől!)



Einstein azonnal felismerte, hogy ez az egyszerű szabályt követő tágulás összhangban van az általános relativitás elméletének egy Univerzum-modelljével, a felfedezőiről Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker Univerzumnak hívott rendszerrel. Az általános relativitás elmélete szerint a mozgást az Univerzum anyaga által hordozott energia hajtja. Az Univerzum tágulása a Föld felszínéről kilőtt rakéta távolodását követő lehetséges mozgástípusok egyikében végződik. Ha a rakéta energiája pozitív, sebessége meghaladja a szökési sebességet, a kilőtt objektum pályája mindörökké eltávolodik a Földtől. Ha az energia negatív, a rakéta emelkedése lelassul, és végül visszahull a Földre. Attól függően, hogy az Univerzum egységnyi térfogatának energiája, az energiasűrűség kisebb-e vagy nagyobb egy kritikus értéknél, a tágulás mindörökké folytatódik vagy egy összehúzódási összeomlásba fordul vissza. Az Univerzum jövőjét illetően tehát a legfontosabb kozmológiai paraméterként az átlagos energiasűrűségnek a kritikus értékhez viszonyított nagysága lép elő.

Visszatérve az 1998-ban közzétett kiterjesztett Hubble-diagramhoz, a mérési pontokhoz berajzolhatnánk a nyitott (örökké táguló) és a zárt (végül összeomló) világegyetem esetén a Hubble-törvénytől várt eltérést. Bármelyik is valósuljon meg, minél hosszabb idő óta „van úton” egy galaxis, a tömegvonzás lassító hatására annál inkább lemarad az állandó ütemű tágulástól. Egyben az egyenletes tágulást tükröző Hubble-törvény szerint a vártnál fényesebbnek mutatkozik, azaz növekvő vöröseltolódással a Hubble-törvény alapján jóval közelebbinek mérik a távolságát. A meglepetés bombája 2000-ben robbant, mert a 42 SN Ia mozgása nem lassuló, hanem *gyorsuló Univerzum* képére utalt. Eszerint az Univerzumunkat alkotó anyagnak kell hogy legyen egy „antigravitáló” hatású összetevője is (**sötét energia**)! Igaz, a szupernóváknak a vártnál halványabb fénye esetleg egy közbenső fényelnyelő közegnek is tulajdonítható. Bruno Leibundgut, az Európai Déli Csillagvizsgáló vezető szupernóva-szakértője 2003 júniusában, egy balatonfüredi nemzetközi doktori kurzuson arról számolt be, hogy növekvő érdeklődésnek és támogatásnak örvendő programjukban immár 155 SN Ia-t figyeltek meg, és az elfogadott, globális szervezésű megfigyelési programmal néhány év alatt kétezerre akarják növelni a megfigyelt szupernóvák számát. Az objektumok vöröseltolódását a 170 százalékos értékig kívánják kitolni. A nagyobb számú szupernóvát tartalmazó minta a már letapogatott tartományokon is finomabban rajzolja ki a tágulás megfigyelhető görbét. A vöröseltolódás szélesebb megfigyelési tartománya pedig lehetővé teszi, hogy az Univerzum globális mozgásának egyes alapesetei, az extragalaktikus por abszorpciós hatása és a mérési adatok közötti eltérés megítélhető legyen.

Megemlíjtük, hogy a Hubble Űrteleszkóp által felfedezett egyik szupernóva vöröseltolódásának nagyságáról folyó szakmai vita során, 2001-ben az ELTE akkori doktorandusza, Budavári Tamás módszere alapján (melyet Szalay Sándor irányításával fejlesztettek ki) olyan javaslat fogalmazódott meg, amelynek a közeljövőben várható esetleges megerősítése perdöntő lehet az antigravitációs hatás létezésének kérdésében. A fiatal kollégánk részvételével végzett elemzés eredménye nem értelmezhető galaxisközi abszorpcióval, ezért kizárná a lassuló táguló Univerzum lehetőségét. De a fizika arany szabálya szerint egy mérés nem mérés...



Hubble, Edwin (1889–1953)

Sötét energia:

a megfigyelt gyorsuló táguló Univerzum mozgásáért felelős anyag- vagy energiakomponens. Jelenleg az eredetileg Einstein által javasolt, majd elvetett kozmológiai állandó hatásával azonosítják, amely azonban nem ad magyarázatot észlelt nagyságára.

Az Univerzum galaxistérképei

CCD:

Charged Coupled Device: töltés-csatolt eszköz. A modern csillagászati fényképezés nélkülözhetetlen eszköze. Ez egy fényérzékeny chip, segítségével a felületén található képpontokban detektált fényintenzitás közvetlenül elektromos töltéssel arányos jellé alakítható, amely számítógéppel feldolgozható.

Hubble Deep Field (HDF):

a Hubble Űrtávcső által készített egyik híres felvétel. Elkészítése során az égbolt egy látszólag üres, sötét tartományát fényképezték hosszú ideig. Ennek eredményeképpen a korai Univerzum addig nem látott, legkorábbi régiói tárultak fel előttünk. 2004 márciusában tették közzé a Hubble Ultra Deep Field felvételt, amely még korábbi állapotot mutat be.

Kvazár:

eredetileg quasar vagy QSO, quasi-stellar object. Csillagnak (pontszerűnek) látszó távoli, extragalaktikus objektumok, az eddig megfigyelt legtávolabbi objektumok. Egyelőre vitatott a távoli, fiatal galaxisokkal való azonosíthatóságuk.

A modern asztrofizikai eszközök egyre halványabb fényforrások megfigyelésére képesek. A bennük használt fényképező eszközök a beérkező fotonok irány szerinti szétválasztásával az égbolt finomrajzolatú térképének felvételét teszik lehetővé. Hosszú expozíciós idővel adják össze a fényforrásokból származó fotonok energiáját az úgynevezett CCD-chipekből felépített kamerákban. Ez a technika másfél évtized alatt forradalmian átalakította az amatőr fotósok életét is.

Az ezzel a technikával felszerelt Hubble Űrteleszkópot az égboltnak azokra a tartományaira irányították, amelyeket a hagyományos csillagászati eszközök tökéletesen sötétnek mutattak. Az eredmény drámai: galaxisok és galaxishalmazok sokasága tárulkozik fel egészen a négyszeresnél is nagyobb (430 százalékos) vöröseltolódás tartományáig.

Évtizedes előkészítés után, 1999-ben indult be a Sloan Alapítvány által támogatott digitális égtérképezési program (SDSS), amely öt év alatt közel egymillió galaxis többszínű fényképét készíti el automatizáltan. A több színszűrős fényképsorozatot földi telepítésű teleszkóppal veszik fel. Olyan eljárást használva, amelyet magyar kutatók jelentős hozzájárulásával dolgoztak ki, e fényképekből meghatározzák az objektumok vöröseltolódásának mértékét. Az SDSS tartja a legnagyobb vöröseltolódású objektum (egy úgynevezett **kvazár**, amelyről még nem bizonyított, hogy galaxis kapcsolható-e hozzá) megfigyelésének rekordját, amelyre az eltolódás 600 százalékos.



*Hubble Deep Field felvétel.
Forrás: R. William (STScI),
the Hubble Deep Field Team
és a NASA*

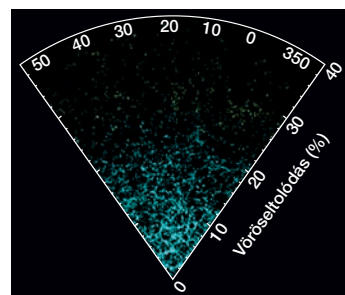


Az SDSS teleszkóp. Forrás: SDSS kollaboráció archívuma. Szalay Sándor szíves engedélyével

A Hubble-törvénytől való esetleges kismértékű eltérések nem változtatják meg a fő tendenciát: aminek nagyobb a vöröseltolódása, az távolabb van, azaz az Univerzum korábbi történeti pillanatáról ad hírt. A galaxisokat az égbolt irányai mentén a vöröseltolódásuk mértékében rendezve alakulnak ki a galaxistérképek, amelyek az Univerzum csillagsomóinak szerkezetéről adnak információt. Az első ilyen térképet az 1980-as évek közepén tették közzé. A térképezés mélysége kevesebb mint két évtized alatt óriásit lépett előre.

A megfigyelt galaxistérképek kialakulását az elméleti kutatók megpróbálják az általános tömegvonzás newtoni törvényeinek segítségével értelmezni. Ennek a számítógépes kozmológiai kutatási iránynak a neve: *N-test szimuláció*. Számításaikban egy-egy galaxis teljes tömegét pontszerű részecskébe koncentrálják, és mozgásukat a Newton-törvénynek megfelelően modellezzik szuperszámítógéppel. A legnagyobb méretű szimulációkban több millió galaxis mozgását követik, és kirajzolják helyzetük alakulását a vöröseltolódás csökkenésével, azaz a mai korhoz közelítve. Kiindulásul a legtávolabbi (legkorábbi, legnagyobb vöröseltolódáshoz tartozó) galaxisoknak az égbolton mért eloszlását választhatjuk. Természetesen az akkori jóval kisebb térfogathoz kell a rendszert elindítani. A későbbi eloszlást érzékenyen befolyásolja az Univerzum egészének egyidejű tágulási mozgása is.

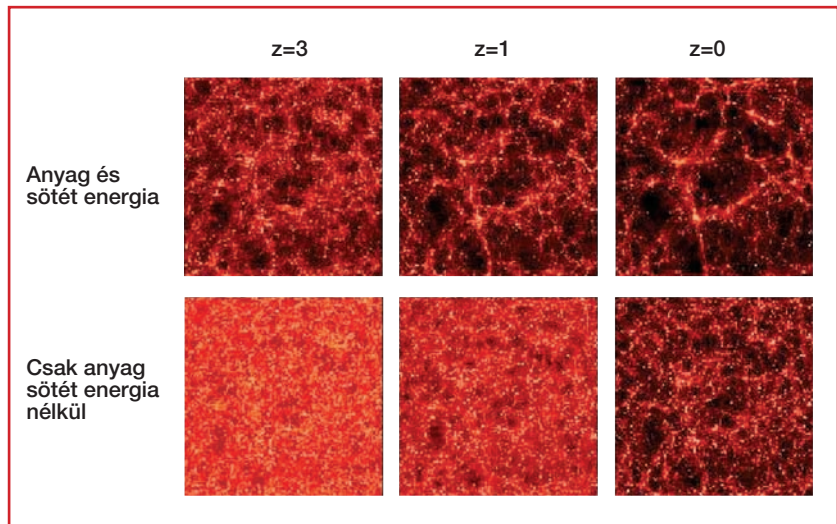
A számítógépes „Univerzum-fejlesztés” eredményeként kirajzolódó égtérképet összehasonlíthatjuk a megfigyeléssel. A gyorsuló vagy a lassuló tágulásra kirajzolódó térképek közül az észleléssel legjobban egyezőhöz tartozó kozmológiai paramétereket igyekszünk meghatározni. Ránézésre talán nehéz különbséget tenni a különféle lehetséges Univerzumok galaxistérképei között, de a statisztikus elemzés (úgynevezett korrelációs analízis) megbízható választ ad például arra a kérdésre is, hogy az Univerzum teljes energiájának mekkora hányadát hordozza a szokásos gravitációjú, és mekkora hányadát az „antigravitációs” hatású (pontosabban gravitáció-



Vöröseltolódási galaxistérkép az égbolt egy szeletéről. Forrás: SDSS kollaboráció archívuma. Adrian Pope és Szalay Sándor szíves engedélyével



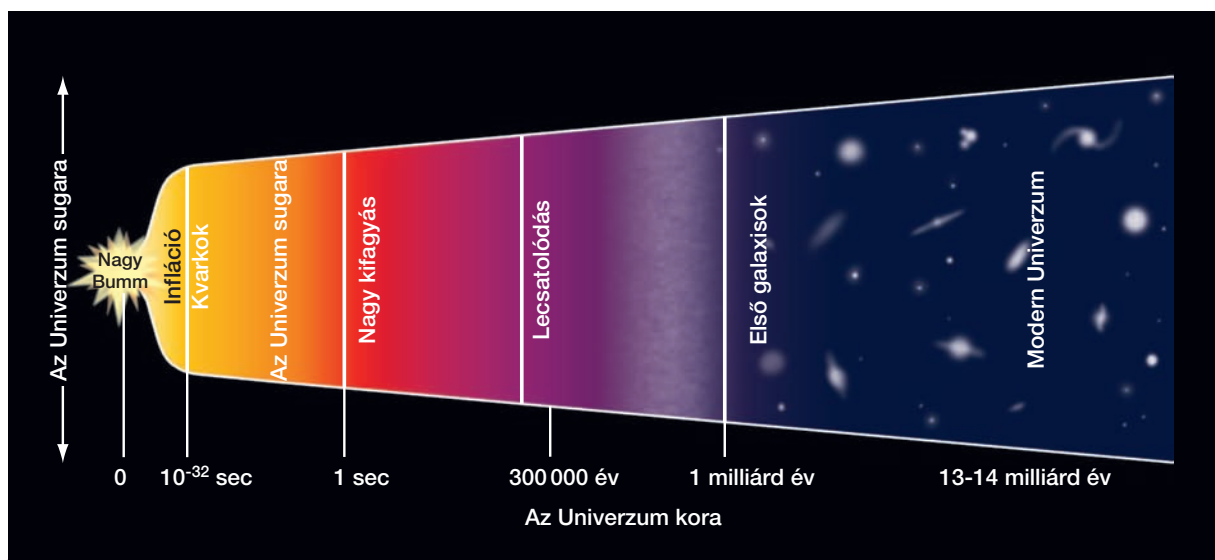
*N-test szimuláció eredményei.
(Jenkins et al. nyomán, 1998)
A bal oldali oszlop azt az állapotot
mutatja, amikor az Univerzum
méretskálája a mainak negyede
volt. A felső sorban a gravitáló
anyag és a nem csomósodó sötét
energia keverékében, az alsóban
a csak gravitáló anyagban
kialakuló struktúra látható*



san nem csomósodó) anyagfajta. E vizsgálat szerint a jó egyezéshez jelentős, közel 70 százalékos részesedésű, gravitációsan összetömörödéssre nem hajló, fényt nem kibocsátó úgynevezett sötét energia jelenlétét kell feltételezni. Az Univerzum jelenlegi állapotában csak 30 százalék a newtoni tömegvonzást követő anyag részesedése. Ez a becslés jól egyezik a gyorsuló tágulás értelmezéséhez legjobban illeszkedő anyagkoncentráció-összetételre nyert adatokkal.

Vajon meddig egészíthető ki az égtérkép az egyre finomabb észlelési technikák révén felfedezett újabb és egyre távolabbi galaxisokkal? Más szóval, mikor jelentek meg az Univerzumban a legősibb galaxisok? Mi történik, ha a szuperszámítógépes szimulációt nem a kisebb vöröseltolódások irányában, hanem (időben visszafelé) a nagyobb vöröseltolódási értékek tartománya felé indítjuk útjára? George Gamow mutatott rá először az 1940-es években, hogy az Univerzum tágulási szakaszain visszafelé haladva egyre kisebb mérettartományba érkezünk, egyidejűleg a fizika törvényei szerint a hőmérséklet fokozatosan növekszik ugyanúgy, ahogy

Az Univerzum korszakai



egy összenyomott gáz is felmelegszik. A *forró Univerzumban* minden szilárd anyag megolvad, majd elpárolog. A csillagok sűrű belső tartományaiban működő nukleáris reakciók a ritka közegben leállnak. Végül a nagyobb összetettségű kémiai vegyületek is elbomlanak. Visszajutunk abba a korba, amikor az anyag legegyszerűbb molekuláiból álló gázkeverék többé-kevésbé egyenletesen töltötte ki a világegyetemet. A magas hőmérséklet okozta hőmozgás sikeresen áll ellen a gravitáció csomósító hatásának. A részletes atomfizikai modellektől függően abban az időszakban, amikor az első struktúrák éppen elkezdtek csomósodni, az Univerzum mérete huszada vagy legfeljebb tizede volt a mainak. Ez nagyjából 12–13 milliárd évvel ezelőtt következett be. A jobb híján ősgalaxisoknak nevezhető első anyagcsomók egészen más képet mutattak, mint viszonylag fiatal társaik, hiszen a csillagokat fűtő nukleáris reakciók ebben a viszonylag egyenletes eloszlású gázban még nem indultak be, az átlagos mozgási energiával mozgó atomok közötti ütközésekben atomfizikai gerjesztés és ezt követő fénykibocsátás nem következik be. Az Univerzumban a méret csökkenésével a *sötétség korszakába* érünk vissza. Ebben a csillagokat megelőző korban ráismerhetünk a csillagokon (galaxisokon) túli szférára, amelyet a görögök nyomán Cicero *Nyx*-nek hívott!

Feltehetjük a kérdést: Remélhet-e a kozmológus olyan relikviát, amely a Mindenség még korábbi korszakából hoz információt, amikor semmiféle, a hagyományos csillagászat mérettartományába eső struktúra nem létezett? Lehetséges-e megismernünk az ősgalaxisok csomósodásának módjához, majd a mai galaxiseloszláshoz vezető út legelejét? A tovább forrásodó gázkeverék relikviái után kutatva elhagyjuk a szokásos csillagászati jelenségek tartományát. A kvantumfizika válik a kutatás fő eszközévé.

A sötét anyag

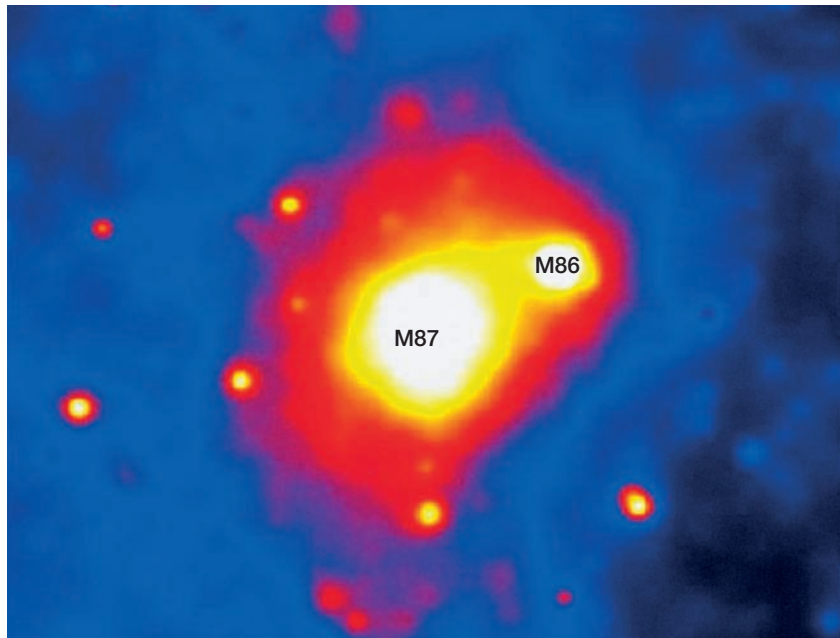
A mikrofizikai kutatás kozmológiai fontosságát még egy igen lényeges jelenségkör alapján is megérthetjük. Ez a közbeiktatott fejezet arra keresi a választ, hogy az Univerzum teljes anyagában 30 százaléknyi részesedésű, szokásos módon gravitáló anyag összetételében mekkora a bennünket alkotó atomok és molekulák részaránya. Ebben a kérdésben a galaxisokat alkotó csillagok, illetve nagyobb méretskálán a galaxisok alkotta halmazok mozgásának részletei adnak felvilágosítást.

A galaxishalmazokban részt vevő galaxisok ugyanolyan kötött rendszert alkotnak, mint a Naprendszer bolygói. A halmaz egésze, a Hubble-törvényt követve, együtt sodródik a táguló Univerzumban, de az egyes tagok közötti tömegvonzás e mozgásra zárt pályán való száguldást is „rárajzol”, amelynek jellemző sebessége 1000 km/s. A galaxisok közötti teret forró gáz tölti ki, amelynek hőmérsékletét abból a tényből lehet megbecsülni, hogy elektromágneses sugárzása a röntgentartományban igen intenzív, éppen ebből tudjuk, hogy a galaxisközi gáz több ezer fokos. Ezen a hőmérsékleten minden anyag, amely elektromágneses kölcsönhatásra képes, világít. Ezért nem

Sötét anyag:

nem világító anyagi összetevő, amely azonban gravitációs hatása révén befolyásolja a megfigyelhető objektumok pályáit. Éppen ez utóbbi hatása alapján következtetnek létezésére.

Galaxishalmaz képe a röntgen-tartományban. Sabine Schindler (Universität Innsbruck) szíves engedélyével



várható, hogy a bennünket alkotó anyag kisebb darabkái, amelyeket „barna törpéknek” is neveznek, megbújnának ebben a rendszerben.

A világító anyag mennyiségére a gáz és a galaxisok sugárzási intenzitásának elemzéséből megbízható becsléseket lehet tenni. A galaxishalmaz teljes tömegét több független módszerrel is meg lehet becsülni, ezek közül egy nagyon látványos optikai effektus segítségével végrehajtott becslést mutatunk be. A nagy tömegek közelében elhaladó fény elhajlásának jelensége is felhasználható a tömeg nagyságának megmérésére. A fény elhajlásának az észlelése a Nap környezetében az általános relativitás elméletének egyik első bizonyítéka volt. Egy galaxishalmaz tömege a Nap tömegének több milliárdszorosa, ezért a **gravitációs lencse** hatás sokkal látványosabb: a galaxishalmaz centruma körül teljesen ellipszissé torzul a valóságban gömbszerű alakzatok képe. A leképezés számszerű értékelésének konklúziója az, hogy a galaxishalmaz össztömegének csak mintegy 4–5 százalékát találhatók a taggalaxisokban és 10–15 százalékát a forró galaxisközi gázban. A többi az ismeretlen *sötét anyag*. Az elemi részek fizikájának egyik legfontosabb kihívása annak a mindeddig ismeretlen, valószínűleg nagy tömegű részecskének a felfedezése, amely a sötét anyag meghatározó komponense.

Az N-test szimulációk kapcsán beszéltünk róla, hogy a newtoni gravitációt kifejtő anyagfajták nagyjából 30 százalékát teszik ki az Univerzum alkotórészeinek. A galaxishalmazokra épülő becslésünkből megérthetjük, hogy a bennünket alkotó anyag, azaz a fényt kibocsátani képes alkotórészek (az elektron, a kvarkok és társaik) mindössze 5 százalékos súllyal rendelkeznek az Univerzum teljes anyagában. Ezt a következtetést más, még korábbi kozmológiai korok relikviáinak elemzése is megerősíti. Nehéz beletörődni, hogy mindaz, amit az emberi tudomány az Univerzum anyagából mindmáig képes volt megragadni, csak ilyen kis részt jelent. A tudomány kalandjának lezárhatatlan folyamatában azonban új fejezetek nyílnak a kíváncsi ember előtt.

Gravitációs lencse:

nagy tömegű, kiterjedt objektum, amely képes a mellette elhaladó fény pályáját elhajlítani és azt optikai lencséhez hasonlóan fókuszálni. Ilyen módon távoli, halvány objektumok fénye is észlelhetővé válik.

A kozmikus háttérsugárzásba kódolt világtörténelem

Az Univerzum egyre korábbi történetébe való visszahatolást ott hagytuk félbe, amikor eltűntek a gravitációval összehúzott (aggregált) struktúrák, és az Univerzumot helyről helyre kissé ingadozó, de többé-kevésbé azonos sűrűségű atomos gázkeverék töltötte ki. Ezt a keveréket a legelemibb atomok, tehát szinte kizárólag hidrogén és hélium alkotta. Az időben visszafelé haladva Gamow, Alpher és Hermann 1948-ban rámutatott, hogy a felforrósodó gáz ütközései egyszer csak elérik az ionizációs küszöböt, legelsőként a hidrogénét. E felett a hőmérséklet felett – a fény elnyelésével és kisugárzásával járó folyamatok kiegyensúlyozódása révén – a fotonok által hordott energiahányad az ionizált plazmát alkotó elektronokkal és protonokkal (röviden: a **barionikus anyaggal**) azonos nagyságrendű. A korábbi korszakokból származó fotonok elnyelődnek az elektronokból és protonokból álló plazmában, a mai megfigyelőhöz az e korszakot megelőző időszakban kibocsátott fény nem juthat el!

Most fordítsuk meg az időnyíl irányát, és vizsgáljuk a hidrogén ionizációs küszöbe környékén bekövetkezett eseményeket az Univerzum hűlésének (tágulásának) folyamatában. A fotonok hullámhossza az Univerzum méretének növekedésével egyre vörösebb lesz. Az a vörösetolódási érték, amelynél a fotonok átlagos energiája már nem elég az időről időre hidrogénmolekulává kapcsolódó elektron és proton szétválasztásához, a földi hidrogén **spektrumához** képest körülbelül 110 ezer százalék (!). Ekkor az Univerzum mérete a mainak nagyjából ezrede volt. Ezt a *rekombinációnak* nevezett jelenséget követően a közel egyenletesen eloszló gáz nem bocsát ki fotonokat, és nem is nyeli el azokat. A rekombináció időszakától mindmáig a világegyetem fotonokkal van tele, amelyek frekvenciája egyre jobban vörösödik a világegyetem tágulásával. Ezeket a fotonokat elválasztva a csillagok és a csillagközi gáz újabb keletű fénykibocsátásától, az Univerzum 13 milliárd évvel ezelőtti állapotáról nyerhetünk információt.

Gamow és munkatársai 1948-ban 4,5 kelvinre becsülték a kozmikus háttérsugárzás fotonjainak mai hőmérsékletét. Az átlagos hőmérsékletnek a mai mérésekből elfogadott értéke 2,725 kelvin (az utolsó értékes jegy lehet 3 vagy 7 is). Mai környezetünk egy köbcentiméterre 410–420 „őskori” foton hordoz. Ennek a sugárzásnak az átlagos hullámhossza a mikrohullámú tartományban van. A mikrohullámú háttérsugárzást 1964-ben A. A. Penzias és R. W. Wilson mutatta ki elsőként.

Az egykori forró gázkeverék sűrűsége követte a gravitációt meghatározó sötét anyag sűrűségeloszlásában fellépő kis egyenetlenségeket. Egyben a különböző töltések közötti erőhatás rezgéseket eredményez az egyensúlyi helyzet körül. Ezek miatt az ingadozások miatt a háttérsugárzás fotonjainak hőmérsékletében az égbolt különböző irányában kis ingadozást várnak. A sűrűbb helyekről nagyobb, a ritkábbakból kisebb frekvenciájú fotonok indultak el az Univerzumot átszelő útvjukra. A gravitációs csomósodások és

Barionikus anyag, barionok:

eredetileg az elemi részecskék egy családja, ezek összefoglaló neve. Környezetünkben a proton és a neutron tartozik ebbe a családba. Az asztrofizikában azonban idesorolnak minden anyagfajtát, mely képes elektromágneses sugárzást kibocsátani (elektron, proton, atommagok).

Spektrum:

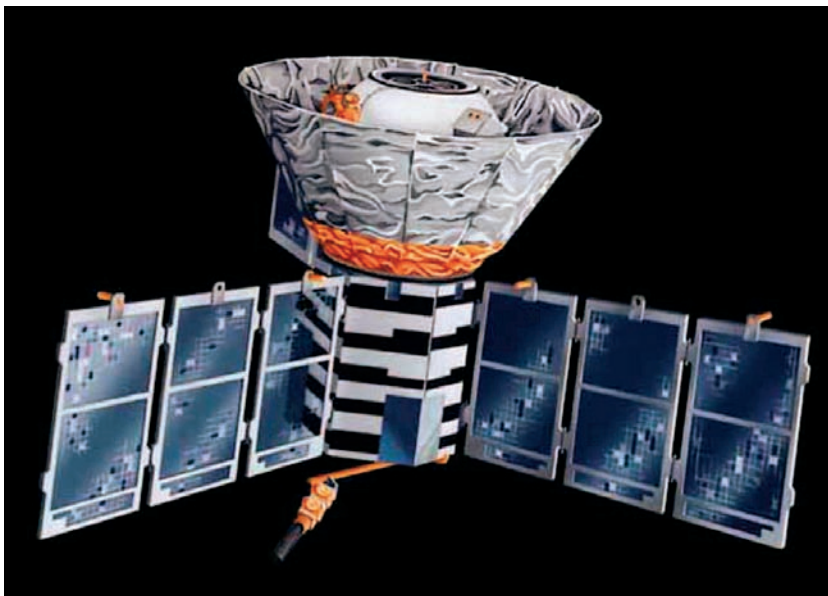
színekép, a fényforrásokból érkező fény felbontható az azt összetevő színekre. A csillagászatban rendkívül hasznos információforrás, mivel a spektrumban meglevő, hiányzó vagy éppen eltorzult tartományok betekintést nyújtanak a fény keletkezési helyén uralkodó fizikai körülményekbe.

Angström:

Spektroszkópiai, mikrofizikai távolságegység, 1 angström = 10^{-10} m, a 19. századi svéd spektroszkópus, Anders Jonas Ångström nevéből.



A COBE műhold és infravörös sugárzási detektora. A teleszkópot a hold felső, tölcsér alakú árnyékolással körülvelt fehér gömbben helyezték el. Forrás: NASA (WMAP Science Team)



ritkulások útközbeni változása is hat a megfigyelhető fény átlagos frekvenciájára. Az ingadozás amplitúdójának az átlaghoz viszonyított nagyságára először 1992-ben tudtak számszerű becslést adni a Cosmic Background Explorer (COBE) mesterséges holdon elhelyezett mikrohullámú detektorok által észlelt sugárzás elemzésével.

Az energiasűrűség relatív ingadozása az átlaghoz képest nagyon kicsinek bizonyult: 1 rész a 100 000-ben, ami a hőmérsékletben a mikro-Kelvin skálán észlelhető. Ez a kis ingadozás egy biliárdgolyó felszínének „rücskösségével” hasonlítható össze. A legkisebb szögkülönbség, amelynek hőmérsékleti differenciáját mérni tudták, 7 fok volt. 1998–2001 között az Antarktiszról léggömbön a magaslégtérbe feljuttatott mérőállomással sikerült a hőmérséklet különböző irányban mért értékei közötti ingadozásokat egy fok eltérésű irányokra is megmérni.

BOOMERanG léggömbös kísérlet az Antarktiszon.

K. Ganga (a BOOMERanG kollaboráció) szíves engedélyével



Miért fontos ez?

A plazma sűrűségingadozásai különböző amplitúdójú sűrűsödési hullámokból állnak össze. Korrelált (kauzális kapcsolatban álló) sugárzást akkora tartományból várhatunk, amekkorát a hullámok az Ősrobbanás pillanatától a sugárzás kibocsátásáig eltelt háromszázezer évben megtettek. Ez a távolság az égbolton legfeljebb 1–2 fok szögműködésű tartományt borít be. A kis szögeltérésű irányok közötti foton-hőmérsékleti eltérés részletes tanulmányozása alapján megismerhetjük a kibocsátás korszakában uralkodó sűrűségingadozásokat. Ezek teljes ismerete lehetővé teszi, hogy a táguló Univerzum gravitációs egyenleteiben kezdeti adatként szerepeljenek, és a gravitációs hatásukat figyelembe vevő szuperszámítógépes megoldással eljussunk a galaxistérképek legnagyobb vöröseltolódáshoz tartozó szerkezetéig! Ha ezt az utat is sikerül bejárni, akkor a mai galaxistérképet visszavetítettük a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás 13 milliárd évvel ezelőtti korszakában uralkodó sűrűségviszonyokra!

Ez indokolta, hogy a NASA 2001 kora nyarán újabb mesterséges holdas mérőállomást lőjön fel, amely a Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) nevet viseli, és 10 szögperces iránykülönbségre is képes megmérni a sugárzás hőmérsékleti különbségét. Ennek a misszióknak az első évéből származó adatokat 2003 februárjában tették közzé. A jobb oldali ábra Vincent van Gogh híres festményének példáján mutatja be, hogyan változik a szögműködésbeli feloldóképesség növelésével a téli éjszaka képe. A minden eddigénél finomabb mikrohullámú égtérképre alapozott számítások vezettek a kozmológiai paramétereknek az előadás elején ismerttetett pontosságú meghatározásához. 2007-ben az Európai Űrügynökség is felbocsátja PLANCK nevű misszióját, amelynek szögfeloldása eléri a szögpercet.

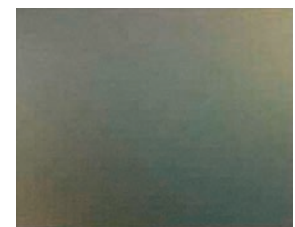
Az eddigi műholdas és légkömbös kísérletek elemzése alapján úgy tűnik, hogy a standard földi atomfizika tökéletesen leírja a korai Univerzumot kitöltő elektron-protonplazma sűrűségének ingadozásait a kauzális kölcsönhatásokkal összekötött tartományokban. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás leírt tulajdonságai között mégis van egy, amelyik érthetetlen. Ez a *háttérsugárzás kibocsátását megelőző fejlődési időszakban* speciális dinamikájú szakaszt kényszerít ki, amely várakozásaink szerint a Forró Univerzum korszakát megelőző történetbe ad betekintést.



VAN GOGH



BOOMERanG



COBE/DMR

Van Gogh festménye különböző, az asztrofizikai eszközöket jellemző szögfelbontású képfeldolgozással. (A BOOMERanG kollaboráció szíves engedélyével)

A háttérsugárzás hihetetlen irányfüggetlensége

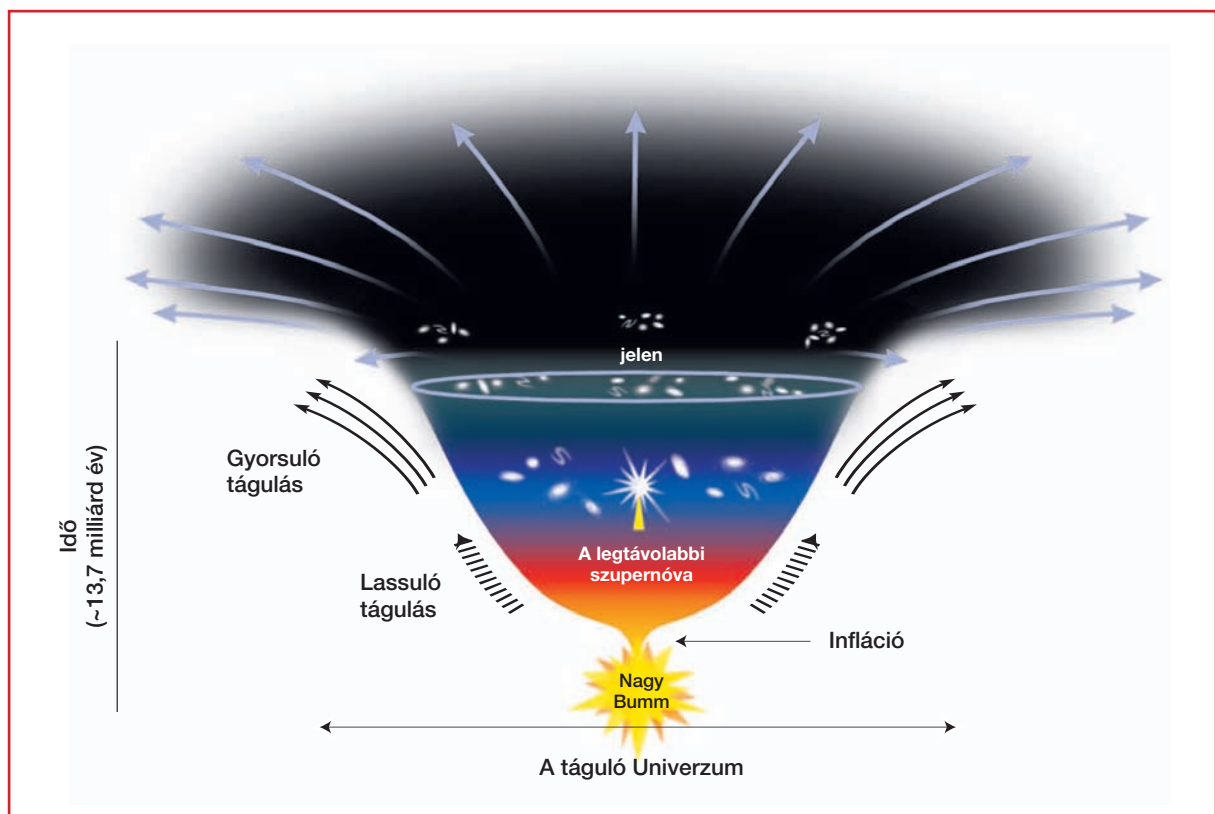
Az igazi szenzációt okozó rejtély létezése valójában már 1992-ben, a COBE mesterséges hold eredményeinek közzétételével kísérleti megerősítést nyert. Alan Guth amerikai részecskefizikus már 1981-ben feltételezte, hogy a különböző irányokból érkező sugárzás hőmérséklete közötti össze-

hangoltság (szinkronizáció) nagyobb szögtávolságú irányokból érkező sugárzásban is észlelhető, mint amelyeket a sugárzás és anyag hatására táguló Univerzumban egymással kauzális kapcsolatban lévő tartományok mérete alapján várunk. A 7 foknál nagyobb szögkülönbségű tartományok között tapasztalt szinkronizáció (a biliárdgolyó simaságú hőmérsékleti kép) látszólag akauzális kapcsolat létét látszik bizonyítani a világegyetem távoli tartományai között. Guth javaslatot tett olyan, a Forró Univerzumot megelőző dinamikára, amely a kauzalitás sérelme nélkül eredményezhette ezt a helyzetet.

Egy extrém rövid, korai szakasz közbeiktatását javasolta, amely a zérus hőmérsékletű hideg és a tetszőlegesen végtelen kiterjedésű világmindenség egy egészen kis tartományában következhet be. Az Ősrobbanás kiindulásul szolgáló tartomány mérete az atomfizikai tartományoknál kifejezhetetlenül kisebb, az úgynevezett Planck-hosszúsággal jellemezhető.

A hipotetikus folyamat lényege az, hogy véletlen ingadozás következtében óriási energia koncentrálódik ebbe a tartományba. A kisenergiájú alapállapotba való visszatérés extrém gyors tágulási folyamattal (*infláció*) valósul meg, amelynek eredményeként a kis tartomány mérete robbanásszerűen makroszkopikussá nő. Az elemi kvantumok kölcsönhatásokkal összecsatolt sűrűség-ingadozások összehangoltságuk elvesztése nélkül szintén makroszkopikussá alakulnak. A kiinduló makroszkopikus sűrűség-ingadozások mikrofizikai ismereteink alapján számíthatók, és ezekből meghatározták a mikrohullámú háttérsugárzás kibocsátásának korszakában érvényes sűrűség-ingadozásokat is.

Az Univerzum három nagy korszaka: infláció, lassuló tágulás, gyorsuló tágulás. (Az infláció a Nagy Bumm utáni igen rövid, óriási méretnövekedési szakasz) (Ann Feild [SDSS] nyomán)



Meghatározott jóslatok tehetők az Univerzumra növekvő térrész energiasűrűségére, a különböző frekvenciájú sűrűségingadozások egymáshoz viszonyított erősségére. Mindezeket az előrejelzéseket a háttérsugárzás pontos mérésével vethetjük össze. A hideg inflációs korszakot követő felforrósodás elképzelésének helyességét a WMAP űrszonda legutóbbi mérései meggyőzően megerősítették. Az észlelt kis eltérések elemzése elindítja azt a folyamatot, amelyben a nagyszámú, egymással versengő inflációs modell közül kiválasztják azt, amely Univerzumunkban meg is valósul.

Egy végtelen kiterjedésű hideg kvantumvilágban több független inflációs esemény is bekövetkezhet. Így bizonyos gyakorisággal rendszeresen (jelenleg is) jöhetnek létre Univerzumunkhoz hasonló világok, amelyek későbbi fejlődése egymástól független. A kialakuló világegyetemek között nincs kölcsönhatás, az egyes világok kozmológiai paraméterei különbözhetnek, az ott ható természeti törvények mások, ezért bennük különböző világtörténetek zajlanak le. Ez a **multiverzum** elképzelése, amely az Univerzumunk méréséből szerzett adatok értelmezésének feladatát a fizikát jellemző statisztikus gondolkörbe vezeti. Univerzumunk egy a sok létező között!

A sötét anyag bizonyosnak tűnő és az antigravitáló hatású anyag esetleges létezéséből származó kihívások mellett az inflációs korszak megismerése a harmadik részecskefizikai kérdéskör, amelyet a modern kozmológiai mérések értelmezése kényszerít ránk. Ez a mai természettörvényeken túlmutató felfedezéseket ígérő program teszi izgalmassá az emberiség számára a mikrofizikát a következő fél évszázadban.

Köszönetnyilvánítás: a szerző megköszöni Borhy László régész egyetemi docensnek, valamint Csabai István és Frei Zsolt fizikus egyetemi docenseknek az előadás koncepciójának kialakításában és tényanyaga megszűrésében, Lippai Zoltán fizikus doktorandusznak az internetes anyag elkészítésében nyújtott támogatását.

Multiverzum:

a valóság egy lehetséges elképzelése természettudományos szemmel. Lényege, hogy nem egy Univerzum létezik, hanem egymástól függetlenül több különböző világegyetem jöhet létre, amelyek azonban nincsenek kapcsolatban egymással, és amelyekben eltérő természeti törvények érvényesülhetnek.



Ajánlott irodalom

Barrow, John D.: A Világegyetem eredete. Bp.: Kulturtrade, 1994.

Hawking, Stephen W.: Az idő rövid története. Bp.: Maecenas, 1989.

Horváth Zsolt: Mikrokozmosz – világunk építőköveinek kutatása. In: *Mindentudás Egyeteme*, 3. kötet. Bp.: Kossuth K., 2004. 155–171.

Livio, Mario: Accelerating Universe. John Wiley, 1999.

Marx György: Az Univerzum korai története. *Fizikai Szemle*, 1979. 3. sz.

Marx György: Bölcsőnk az Univerzum. *Fizikai Szemle*, 1987. 3. sz.

Marx György: Eötvös Lorándtól a sötét anyagig. *Fizikai Szemle*, 1994. 5. sz.

Németh Judit: Mi a sötét energia? *Fizikai Szemle*, 2004. 1. sz.

Newton, Isaac: A Principiából és az optikából. Levelek Bentleyhez. Bukarest – Bp.: Kriterion – Európa, 1981.

Patkós András: Kozmológia: az Univerzum történetének tudománya. *Magyar Tudomány*, 2004. június.

Patkós András: A Világegyetem állapotától a Világegyetem történetéig. *Fizikai Szemle*, 1992. 2/3. sz.

Patkós András: Az éter titkaitól a szupergyors adatfeldolgozásig. *Természet Világa*, „Mikrofizika” különszám, 2000. október.

Patkós András: Század eleji részecskefizikai probléma panoráma. *Természet Világa*, 2002. január.

Perkins, Donald H.: Particle Astrophysics. Oxford University Press, 2003.

Shu, Frank H.: The Physical Universe: An Introduction to Astronomy. University Science Books, 1982.

Weinberg, Steven: Az első három perc. Bp.: Gondolat, 1983.

Kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás

<http://map.gsfc.nasa.gov> (WMAP)

<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe> (COBE)

Galaxistérképek

<http://www.sdss.org>

Szupernóvák mozgása

<http://panisse.lbl.gov> (Supernova Cosmology Project)

<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html> (High Redshift Supernova Search)